

# 潜艇密闭舱室二氧化碳清除措施探析

彭光明

(中国舰船研究设计中心,湖北武汉430064)

**摘要:** 二氧化碳是潜艇舱室的主要有害气体,主要由人员呼吸产生。介绍了潜艇密闭舱室二氧化碳的几种清除措施的原理和优缺点,分析了国外潜艇二氧化碳清除技术的发展过程、最新技术和未来发展趋势。

**关键词:** 二氧化碳;清除;潜艇;密闭舱室

中图分类号:U674.76

文献标识码:A

文章编号:2019(2006)03-31-05

## Analysis of Carbon Dioxide Scavenging Measures for Submarine Airtight Cabin

Peng Guang-ming

**Abstract:** Carbon dioxide is a sort of the primary harmful gas in submarine airtight cabin, from which personnel breathing is the main source. In order to eliminate the gas effectively, several carbon dioxide scavenging measures for the airtight cabin are introduced, and the principles of removing harmful gas and the virtues and defects of each measure are presented. The development, techniques up to date and direction of developing carbon dioxide scavenging techniques for submarine worldwide is analyzed.

**Key words:** carbon dioxide; scavenging; submarine; airtight cabin

### 1 概述

潜艇是一个有限的密闭空间,艇员在呼吸的过程中不断呼出二氧化碳,平均每人每小时呼出二氧化碳 20~25 L,同时,舱室物质的氧化燃烧也在不断生成 CO<sub>2</sub>。舱室理想的 CO<sub>2</sub> 浓度为 0.03%,此浓度与正常环境中的基本浓度水平相同,而受体积和能量的限制,实际潜艇舱室里二氧化碳的浓度要达到 0.03% 是不可能的。CO<sub>2</sub> 浓度在 0.5%~1.0% 之间时,艇员较长时间暴露在这个环境里不会产生有害影响,此浓度范围已被大多数海军部门所采纳,并已应用于潜艇设计。当潜艇舱室的 CO<sub>2</sub> 浓度达 3.0% 时,艇员将很难完成体力工作任务,当浓度达到 5% 时,艇员连轻度的劳动也很难完成<sup>[1]</sup>。

随着技术的不断发展,潜艇舱室 CO<sub>2</sub> 的清除方式得到了改进和提高,从高能耗向低能耗发展,从低效向高效发展。常用的 CO<sub>2</sub> 清除方式有以下几种:

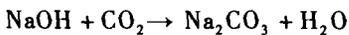
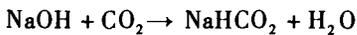
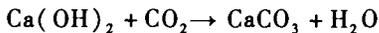
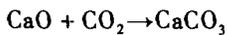
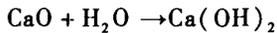
- a) 碱石灰吸收 CO<sub>2</sub>;
- b) 超氧化物吸收 CO<sub>2</sub>;
- c) LiOH 清除 CO<sub>2</sub>;
- d) 分子筛吸附 CO<sub>2</sub>;
- e) 一乙醇胺(MEA)清除 CO<sub>2</sub>;
- f) 固态胺清除 CO<sub>2</sub>。

以下将对各种二氧化碳清除方式的原理及优缺点进行分析。

### 2 碱石灰吸收 CO<sub>2</sub>

碱石灰的主要成分是 CaO(或 Ca(OH)<sub>2</sub>)和 NaOH 的混合物。大量使用的碱石灰是

90%的CaO与4%的NaOH所组成的混合物。其反应原理为:



碱石灰内NaOH含量的多少直接影响其吸收CO<sub>2</sub>和水的速度,NaOH含量越多,吸收CO<sub>2</sub>的速度越快,吸收水份也越容易,其吸收过程所产生的热量也越多,反之,NaOH含量越低,吸收CO<sub>2</sub>的速度也会降低,其作用时间也可延长。碱石灰吸收CO<sub>2</sub>的性能与其本身的含水量有关,且吸水之后易发生液化和粘连现象。其最大的缺点是,吸收过程易受温度和湿度的影响,当温度低于18℃、相对湿度小于60%时,吸收失效。另外,碱石灰吸收CO<sub>2</sub>的速度慢、吸收容量小。

碱石灰通常用密封罐或密封滤筒储存。使用时,将密封罐或密封滤筒安装到吸收装置中,采用风机抽风,使空气流经碱石灰,这时,空气中的CO<sub>2</sub>会与碱石灰发生化学反应,进而有效吸收CO<sub>2</sub>。

碱石灰的优点是毒性小,使用方便,价格便宜,因而曾广泛应用于常规潜艇,但因上述缺点,许多国家后来又纷纷改用LiOH。法国最早的潜艇是采用超氧化物的混合物来清除CO<sub>2</sub>,但由于质量差,曾引起过多次爆炸,已于1917年停止使用,后来又采用NaOH,但因其腐蚀性强,已于1938年用碱石灰代替,并一直用于常规潜艇。

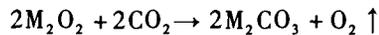
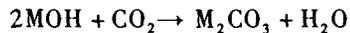
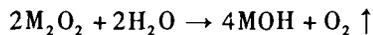
另外,碱石灰清除CO<sub>2</sub>耗电量小,单个碱石灰密封罐体积小,与常规潜艇的电量和空间紧张相适应。

### 3 过(超)氧化物吸收CO<sub>2</sub>

#### 3.1 吸收CO<sub>2</sub>的原理

过(超)氧化物是一种很活泼的氧化剂,氧

化能力胜过氟、高锰酸盐等强氧化剂。过(超)氧化物在热分解时会放出氧气,与其他物质发生化学反应时也会放出氧气<sup>[2]</sup>。它们在水蒸汽存在的条件下,与CO<sub>2</sub>反应会生成氧气。过氧化物与水、CO<sub>2</sub>进行的反应如下:



一般常用的空气再生药剂是过(超)氧化钠和过(超)氧化钾。式中的M代表钠、钾等碱金属元素。

#### 3.2 优点与缺点

过(超)氧化物再生药剂在吸收了含水蒸汽的CO<sub>2</sub>后,会发生膨胀与糊状现象,其反应效率显著降低。因此,对于高温高湿的海洋环境,过(超)氧化物利用效率低。

过(超)氧化物具有强氧化性,其颗粒挥发到大气中不仅对设备具有腐蚀性,对人体的呼吸系统也会产生损伤,给潜艇舱室大气环境控制带来不利因素。

人是不断吸入氧气,呼出CO<sub>2</sub>,而过(超)氧化物的氧化反应则刚好相反,是吸收CO<sub>2</sub>,放出氧气。因此,利用过(超)氧化物进行空气再生不仅体积小、重量轻、效率高,同时还可清除舱室部分异味。

#### 3.3 使用场合

在国外,过(超)氧化物大量用于潜艇舱室的呼吸供氧和CO<sub>2</sub>的清除。在国防工事、携带式面具、宇宙飞船等密闭环境内,也广泛使用过(超)氧化物来作为空气再生药剂,以执行供氧和清除二氧化碳的任务。

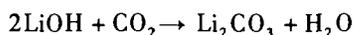
东欧和前苏联等国家的常规潜艇是使用过(超)氧化物来清除CO<sub>2</sub>。最具代表性的是,直至目前为止,俄罗斯的常规潜艇仍在采用过(超)氧化物,并且还在核潜艇上作为应急空气再生装置。

另外,过(超)氧化物清除CO<sub>2</sub>耗电量小,

单个过(超)氧化物密封罐体积小,特别适合常规潜艇使用。

## 4 LiOH 清除 CO<sub>2</sub>

国外潜艇应用比较广泛的是用 LiOH 清除 CO<sub>2</sub>。与其他固体吸收剂相比, LiOH 具有单位重量和单位体积吸收 CO<sub>2</sub> 能力大的特点,其吸收效果最佳,受温度影响最小,且还能在低温(-10℃)条件下使用。另外, LiOH 还能清除氯气等一些有害气体,其吸收产物稳定,是目前潜艇和密闭环境下清除 CO<sub>2</sub> 较好的固体吸收剂。LiOH 与 CO<sub>2</sub> 进行的反应如下:



无水 LiOH 的粉尘对人的鼻、喉、眼睛和皮肤都有强烈的刺激作用。潜艇用 LiOH 吸收剂是用含一份水的氢氧化锂(LiOH·H<sub>2</sub>O)经过重结晶、烘干等步骤而获得的晶体。

LiOH 的储存和使用方法与碱石灰相同,是通过吸收装置的风机鼓风,使空气流经 LiOH 药剂而加速 CO<sub>2</sub> 的清除。在应急情况下,也可将 LiOH 颗粒散开铺放在平板上,通过空气的自然对流来对 CO<sub>2</sub> 起到一定的吸收效果。

与碱石灰相比, LiOH 的优点在于其吸收能力比碱石灰强。LiOH 与碱石灰吸收 CO<sub>2</sub> 的重量比为:每 100 g LiOH 吸收 CO<sub>2</sub> 95.9 g,而每 100 g 碱石灰吸收 CO<sub>2</sub> 59.4 g。因此,如采用 LiOH 清除 CO<sub>2</sub>,则艇上配备 LiOH 的药剂重量会大大减少。各国也正在逐步用 LiOH 代替碱石灰。

LiOH 清除 CO<sub>2</sub> 的缺点在于其价格昂贵,成本高,同时其生成物的稳定也不利于二次回收利用。

日本的潜艇是用 LiOH 来清除 CO<sub>2</sub>,国外其他海军也逐步在用 LiOH 取代其他固体吸收剂。美国核潜艇则将 LiOH 作为清除 CO<sub>2</sub> 的应急措施。

LiOH 清除 CO<sub>2</sub> 耗电量小,单个 LiOH 密封罐体积小,特别适合常规潜艇使用。

## 5 分子筛吸附 CO<sub>2</sub>

### 5.1 分子筛吸附 CO<sub>2</sub> 的原理

分子筛吸附 CO<sub>2</sub> 是通过物理方法,将 CO<sub>2</sub> 吸附到分子筛微孔的内表面上。最常见的分子筛材料为人工制造的陶土,即沸石。分子筛呈网状,与蜂窝的内部结构相似,其上各个小孔的尺寸统一,约大于一个 CO<sub>2</sub> 分子。当受 CO<sub>2</sub> 污染的空气流经一个沸石分子筛珠床时, CO<sub>2</sub> 分子就会停留在珠状分子筛的小孔内,此过程会一直持续到整个吸收面全部被 CO<sub>2</sub> 所占满,并有 CO<sub>2</sub> 从沸石分子筛溢出为止。随后,气流便被导入另一个沸石分子筛。已吸收 CO<sub>2</sub> 饱和的分子筛会与气流隔开,并进行加热,以便将 CO<sub>2</sub> 从吸收床驱赶出来。为了帮助从吸附床去除 CO<sub>2</sub>,可使用真空泵抽吸, CO<sub>2</sub> 便经压缩机排出舷外。经脱离了 CO<sub>2</sub> 后的吸附床可再次进行 CO<sub>2</sub> 吸附,如此周而复始地进行吸附和脱吸处理。

分子筛分温度交变分子筛和压力交变分子筛两种。温度交变分子筛吸收装置是通过压缩机强制空气通过一个沸石分子筛床,当该床饱和时,就由内装的加热器进行再生,用一台真空泵辅助空气再生,再用一台压缩机将 CO<sub>2</sub> 和 F12 混合气排至舷外。在空气通过温度交变分子筛吸附装置时,经催化氧化又将 H<sub>2</sub>、CO 清除掉。压力交变分子筛吸附装置则是在某一压力下实现吸附,而后通过降低压力并结合非吸附性气流吹洗来实现解吸。

### 5.2 优点与缺点

使用分子筛吸附 CO<sub>2</sub> 须先将含有 CO<sub>2</sub> 的气流烘干,这通常要使空气的露点达到 -70℃。当分子筛采用 5Å 时,会优先吸收水汽。对气流进行烘干有助于使变温分子筛具有去除 CO 和氢气的联合功能。

分子筛不仅可以清除 CO<sub>2</sub>,还可清除其他各种污染物,如氟利昂、一些轻的碳氢化合物及一些活性碳不能吸附的水溶性产物。分子筛吸

附装置的缺点是结构复杂,操作不便,效率低。

### 5.3 使用情况

英国独自研制了温度交变分子筛和压力交变分子筛两种多用途分子筛吸附装置。压力交变分子筛吸附装置因技术上的原因从未装艇使用过,并早已停止研制。而温度交变分子筛吸附装置虽已装艇使用多年,但因其结构复杂、操作不便、效率低等原因也已停止生产。

法国的核潜艇就安装有分子筛吸附装置,装置是采用 $13\text{\AA}$ 分子筛。他们于1964年开始试验研究,1969年便开始在SSBN级核潜艇上使用。

受电量和体积的限制,分子筛技术不适合常规潜艇使用。

## 6 一乙醇胺(MEA)清除 $\text{CO}_2$

### 6.1 工作原理及设备组成

一乙醇胺二氧化碳吸收装置由主机和二氧化碳压缩机组成。主机由风机、泵、吸收塔、脱吸塔、离子交换柱、活性炭过滤器、热交换器、冷却器、管系、阀件、一次仪表和控制箱组成<sup>[3]</sup>。

潜艇各舱室中,对于含 $\text{CO}_2$ 浓度较高的空气,由离心式鼓风机从抽风总管抽取,然后送入填料吸收塔塔顶与含有一定量添加剂的乙醇胺溶液在吸收塔内并流接触,浊空气中的 $\text{CO}_2$ 被乙醇胺溶液吸收,夹带液体和杂质的空气则进入净化塔进行净化和冷却。净化后的空气再配上制氧装置的氧气,经总送风管送到各舱室供艇员呼吸使用。

吸收了 $\text{CO}_2$ 的乙醇胺溶液分两路输送:一路由吸收泵送入吸收塔循环吸收 $\text{CO}_2$ ;另一路由吸收塔送入脱吸塔塔顶,经列管换热器和螺旋板式换热器,最后进入吸收塔,在吸收塔内加热放出 $\text{CO}_2$ , $\text{CO}_2$ 经净化、冷却后经二氧化碳压缩机排出舷外。

### 6.2 优点与缺点

MEA清除二氧化碳装置随着核潜艇的问

世就开始在上面使用,经过多年的改进,装置的性能和效率有了很大提高,基本满足核潜艇清除 $\text{CO}_2$ 的要求。当前,各国核潜艇仍主要使用MEA装置清除 $\text{CO}_2$ 。

MEA装置的优点是,一乙醇胺吸收液为可再生式,除了需要消耗电能外,避免了大量携带吸收药剂,对于长时间潜航的核潜艇,只能采用可再生式。用一乙醇胺吸收 $\text{CO}_2$ ,可使舱室 $\text{CO}_2$ 的浓度保持在较低水平。

MEA装置的缺点是体积大、能耗大,还具有向舱室泄漏一乙醇胺,造成舱室二次污染的危险。

### 6.3 发展和使用情况

美国是最早研究和使用的MEA清除 $\text{CO}_2$ 的国家,经过不断的改进和完善,MEA已成为美海军潜艇清除 $\text{CO}_2$ 的主要装置。

英国皇家海军在上世纪60年代采用的是美式MEA二氧化碳清除装置,后来使用的是经过改进、自行设计的MEA装置。

MEA清除 $\text{CO}_2$ 应用于常规潜艇受电量和体积的限制,目前还没有常规潜艇使用的实例。

## 7 固态胺清除 $\text{CO}_2$

### 7.1 工作原理

固态胺清除二氧化碳系统主要由2~4个循环操作的固态胺吸收罐组成,另外还配备有1台风机、1台冷凝交换器,以及二氧化碳压缩机和一个控制柜等。

其基本工作原理是,通过风机将舱室空气抽入系统,吸入的空气在经过固态胺吸收罐时,气流中的 $\text{CO}_2$ 被固态胺吸收,被清除了 $\text{CO}_2$ 的空气再回到舱室。对于已大量吸收 $\text{CO}_2$ 的吸收罐,要转入解吸过程,通过蒸汽加热进行 $\text{CO}_2$ 解析,解析出的 $\text{CO}_2$ 经压缩机排出艇外。经解吸后的固态胺吸收罐可重新再用。 $\text{CO}_2$ 的吸收和解吸过程全部通过自动控制完成。

## 7.2 优点与缺点

固态胺吸附剂是一种表面积很大的多孔塑料基质聚合物,其装配为层状密集形式,体积紧凑,结构严密,特别适于清除潜艇中的 $\text{CO}_2$ ,且其还克服了液体吸收剂喷淋所引起的诸多不便。此外,由于固态胺呈多孔型,表面积大,不仅提高了吸附效率,而且还避免了有害气体的逸出,从而克服了对舱室空气造成二次污染的问题。固态胺吸附剂的另一个优点是与水有着良好的兼容性,可以用蒸汽加热而不必在胺层中装配加热器。

与当前使用的一乙醇胺二氧化碳清除装置相比,用固态胺清除 $\text{CO}_2$ 操作简便、能耗低、体积小、装置简化。一乙醇胺只能使舱室 $\text{CO}_2$ 的浓度维持在0.5%,而固态胺则可使其进一步降低到0.2%。

## 7.3 发展和使用情况

用固态胺清除 $\text{CO}_2$ 最初是运用于空间站,随后也开始了潜用研究。据资料报导,1983年,美国汉密尔顿标准部已研制出1:10的样机,并进行了大量试验。多项试验结果表明了该项技术的可行性,并证明了固态胺材料具有使用寿命长的特点。截至1989年止,对于固态胺吸收 $\text{CO}_2$ 能力的研究表明,除了在开始的10个循环中其吸附能力的降低大一些外,在以后至90天的试验中,其吸附能力相对比较稳定,降低很少,总共只有7%。经过改进设计,可进一步防止固态胺受高温降解和释放有机蒸汽。

最近,日本海军已研制出固态胺二氧化碳吸收装置,并计划安装到AIP潜艇上,该装置可通过蒸汽加热进行连续再生。

## 8 未来 $\text{CO}_2$ 清除的发展方向

二氧化碳的清除是潜艇中维持艇员生命的关键问题之一,尤其是对连续潜航时间较长的核潜艇来说,就显得尤为重要。各国常规潜艇都在不断延长水下连续潜航时间,新型AIP潜艇的水下连续潜航时间可长达30~60昼夜,因

此,解决潜艇长时间的 $\text{CO}_2$ 清除问题是潜艇总体技术发展的目标之一。

虽然可用于密闭舱室和常规潜艇的 $\text{CO}_2$ 清除措施较多,但经过多方分析和研究认为,对具长时间潜航能力要求的潜艇来说,只有采取再生式 $\text{CO}_2$ 清除措施才能满足其要求。

当前,核潜艇 $\text{CO}_2$ 的清除绝大部分都采用一乙醇胺。一乙醇胺清除二氧化碳装置是随着核潜艇的问世就已开始使用的,在经过几十年的结构改进设计、吸收剂的优化处理和使用添加剂等措施,装置的性能和效率有了很大的提高和改进,基本满足了潜艇 $\text{CO}_2$ 清除的要求,成为半个世纪以来各国海军核潜艇的主要二氧化碳清除设备,并将在未来很长一段时期内仍是各国核潜艇二氧化碳清除的主要设备。

一乙醇胺清除二氧化碳装置固有的缺点总是存在,如装置体积大、效率低,以及易泄漏而造成舱室的二次污染。即使一乙醇胺清除二氧化碳装置的性能和可靠性达到其最佳水平,也只能使舱室大气中 $\text{CO}_2$ 的浓度最低维持在0.5%,如要进一步降低,就必须采取更新的技术和设备。在这种背景下,使得各国海军不得不探索研究新技术和新途径,由此,固态胺消除二氧化碳技术便应运而生,由美国首先开始研制,其他国家也相应地投入了大量人力物力开展研究。

固态胺消除二氧化碳是以固体聚合物作为吸收剂,与一乙醇胺清除二氧化碳装置相比,具有性能稳定、安全可靠、运行寿命长、无腐蚀、体积小、重量轻、控制简单、控制二氧化碳浓度低等特点,因此,固态胺消除二氧化碳技术将逐步取代一乙醇胺,并成为主要的发展方向。

用固态胺清除 $\text{CO}_2$ 解决了体积、能耗和可靠性方面的问题,也适用于常规潜艇。一般认为,对现有固态胺材料和 $\text{LiOH}$ 进一步加以改进,将固态胺作为正常的 $\text{CO}_2$ 消除手段,而 $\text{LiOH}$ 则作为舱室应急 $\text{CO}_2$ 消除措施,这是潜艇舱室大气 $\text{CO}_2$ 清除研究的 (下转第45页)

题负责。至于是采用“铅封”还是“封印标记”的形式并不重要,完全不影响仪表的正常使用。



图 6 压力仪表的铅封

行保证了某系列在役艇上压力仪表的完整、统一、规范,保证了部队的正常使用。通过课题对压力仪表开展的一系列研究,加深了对在役艇上压力仪表使用现状的了解,深化了与使用部队的沟通和理解。在这方面积累的诸多经验,对于在以后的设计工作中对压力仪表在潜艇上的应用方面具有现实的指导意义。

参考文献

[1] 上海市检测技术所,上海计量测试技术研究院. JJG52-1999 弹簧管式一般压力表、压力真空表和真空表[S]. 北京:中国标准出版社,2000.

8 结束语

“某系列艇压力仪表换装”工作的顺利进

收稿日期:2005-10-08

作者简介:张汉文(1975-),男,工程硕士在读,工程师

\*\*\*\*\*

(上接第 35 页)

最佳途径,不仅是核潜艇,也是常规潜艇未来 CO<sub>2</sub> 消除的发展趋势。

[2] 潜艇空气再生和分析编写组. 潜艇空气再生和分析. 北京:国防工业出版社,1983.

[3] 陈根年. 潜艇人一机一环境系统工程的进展和展望[J]. 舰船科学技术,2001(3).

参考文献

[1] 裴云彩. 潜艇医学手册. 北京:海军后勤部卫生部,1980.

收稿日期:2006-03-28

作者简介:彭光明(1974-),男,硕士,工程师

\*\*\*\*\*

(上接第 38 页)雾灭火系统的实舰应用研究。舰船上要应用一种新的消防技术时,一定要做到慎之又慎。在实舰上进行应用研究时可分两步走,第一步是针对舰船上不同防护处的特点进行分类,确定并规范各分类系统的组成和要求,切实解决系统的配置和管网的优化等各种具体的设计问题;第二步是各分类系统还需再通过陆上的实尺模型试验,以验证系统的可靠性和可用性,验证灭火效果的设计要求。只有通过严密的科学程序,才能万无一失地将细水雾灭火系统应用到舰船上。

从环境保护、灭火效果、设备安全性、人员防护及二次灾害损失等方面进行比较,均远优于传统的气体灭火系统和水喷雾、水喷淋等灭火系统,相信只要深入研究、开发,细水雾技术在舰船上应具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 刘江虹等. 细水雾灭火技术及其应用. 火灾科学[J],2001(4).

[2] 苏海林等. 细水雾灭火机理探讨. 消防科学与技术[J],2000(4).

[3] 高作龙. 浅谈细水雾灭火系统. 本溪冶金高等专科学校学报[J],2003(4).

4 结论

作为新兴的水消防灭火技术——细水雾灭火系统,它具有气体灭火和水灭火的双重特性。

收稿日期:2005-09-05

作者简介:袁立军(1979-),男,硕士研究生,工程师